

ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАТОРА ВИТКОМ СВЯЗИ

Н. А. ЛАШУК, В. И. ТОЛМАЧЕВ

(Представлена семинаром лаборатории высоких энергий НИИ ЯФЭА)

Для того, чтобы возбудить объемный резонатор, т. е. скомпенсировать имеющиеся в нем потери, необходимо связать его с источником высокочастотных колебаний. Связь источника с резонатором может быть индуктивной, кондуктивной, емкостной и щелевой. Последний способ используется в диапазоне СВЧ колебаний при возбуждении резонатора волноводом. Первые три способа с энергетической точки зрения равноценны и применение каждого из них обуславливается типом колебаний, который необходимо получить в резонаторе, удобством подвода энергии и размещения элементов связи.

В случае передачи энергии коаксиальным кабелем (фидером) целесообразно применять индуктивный способ возбуждения, так как он обеспечивает простое крепление кабеля и доступ к элементам связи. Эквивалентная схема возбуждения резонатора, в котором распределенные индуктивность и емкость могут рассматриваться как сосредоточенные, приведена на рис. 1. Цепь, состоящая из высокочастотного генератора, фидера, элементов связи и резонатора, представляет собой систему из двух связанных контуров, возбуждающего и возбуждаемого.

В схеме рис. 1, б

$$R_1 = W_\phi + r_1 \text{ и } R_2 = r_2 + r_n,$$

где W_ϕ и r_1 — волновое сопротивление фидера и сопротивление потерь витка;

r_2 и r_n — сопротивление потерь резонатора и сопротивление из-за нагрузки пучком;

L_1, C_1, L_2, C_2 — эквивалентные индуктивности и емкости цепи возбуждения и резонатора;

$e(t)$ — напряжение, развиваемое генератором на входе фидера. Составляя дифференциальные уравнения для системы контуров и рассматривая входное сопротивление со стороны резонатора для токов I_1 и I_2 , получим следующие выражения:

$$i_1 = \frac{j\omega MI_2 - e(t)}{Z_1} = -\frac{e(t)}{Z_1} \left(1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_1 Z_{23}} \right), \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{j\omega Me(t)}{Z_1 \left[\left(R_2 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_1^2} R_1 \right) - j \left(X_2 - \frac{\omega^2 M^2}{Z_1^2} X_1 \right) \right]} = \frac{j\omega Me(t)}{Z_1 Z_{23}}, \quad (2)$$

$$\text{где } Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}, \quad X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2},$$

M — величина связи между контурами.

При решении задачи о возбуждении резонатора представляет интерес получение максимального напряжения на ускоряющем зазоре или, что то же самое, максимального контурного тока. Это условие выполняется при определенной связи между контурами и определенных эквивалентном и полном сопротивлениях контура возбуждения и резонатора.

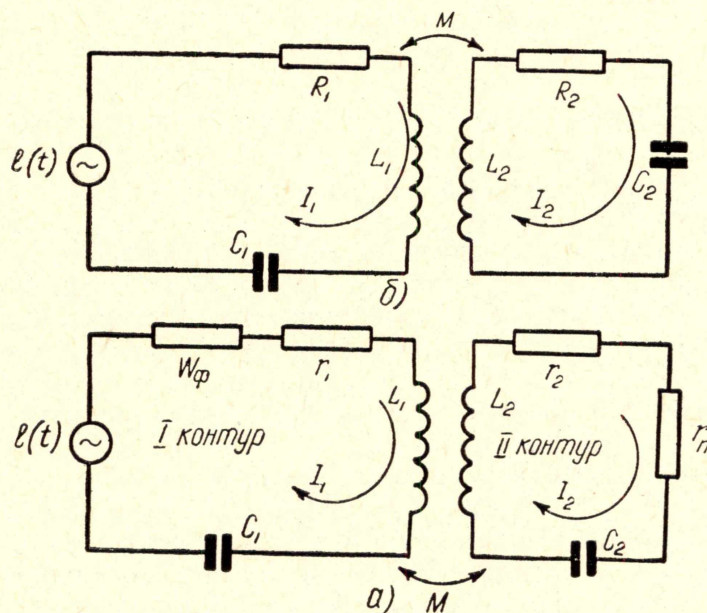


Рис. 1. Эквивалентная схема возбуждения резонатора, сильно нагруженного емкостью.

Анализируя выражения (1) и (2), можно показать, что при полном резонансе, т.е. когда частоты генератора, резонатора и контура возбуждения равны, токи определяются выражениями:

$$i_{1\max} = \frac{e(t)}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2}} = \frac{e(t)}{R_{13}}, \quad (3)$$

$$i_{2\max} = \frac{j\omega Me(t)}{R_{13} R_2} = i_{1\max} \frac{j\omega M}{R_2}. \quad (4)$$

В случае частного резонанса, когда частота контура возбуждения постоянная, а частота резонатора регулируется при $X_2 = X_1 \frac{\omega^2 M^2}{Z_1^2}$, выражения для токов принимают вид

$$i_{1\max} = \frac{e(t) Z_2}{R_{23} Z_1}, \quad (5)$$

$$i_{2\max} = \frac{j\omega Me(t)}{R_{23}Z_1} = i_{1\max} \frac{j\omega M}{Z_2}. \quad (6)$$

Аналогичные выражения можно получить и для другого частного резонанса, когда частота резонатора постоянная, а частота контура возбуждения регулируется.

Токи в уравнениях (5) и (6) не являются предельными, они зависят от связи между контурами. Беря производную $\frac{dI_2}{d\omega M} = 0$ и решая относительно связи, найдем для полного и частного резонансов

$$M_{1\text{opt}} = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{\omega} \text{ и } M_{2\text{opt}} = \frac{Z_1}{\omega} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}. \quad (7)$$

Подставляя M_{opt} в соответствующие значения токов $I_{2\max}$, получим, что для каждого из рассмотренных случаев предельные токи одинаковы и равны

$$I_{2\max} = \frac{e(t)}{\sqrt{R_1 R_2}}. \quad (8)$$

В случае частного резонанса для получения предельного тока необходимо увеличение связи по сравнению с полным резонансом. Можно показать, что для небольших расстроек это увеличение незначительно и легко может быть реализуемо. При больших расстройках увеличение связи становится существенным и в итоге может послужить ограничением для получения предельного тока.

Зависимость токов от связи определяется выражением

$$\frac{I_2}{I_{2\max}} = \frac{2 \cdot \frac{M}{M_{\text{opt}}}}{1 + \frac{M^2}{M_{\text{opt}}^2}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{X^2}{R_1^2}}}{2 + \frac{X^2}{R_1^2}}, \quad (9)$$

теоретические кривые которой для $X=0$ и $X=R$ приведены на рис. 2. Из сравнения кривых следует, что при $X=R$ требуется увеличение связи в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с оптимальной, и максимум кривой становится менее острым. Естественно, что наиболее выгодным при возбуждении резонатора является случай полного резонанса. Однако использование конденсатора C_1 в контуре возбуждения нежелательно по следующим причинам. Во-первых, из-за резонанса напряжений в последовательном контуре на его элементах будет развиваться большое в.ч. напряжение, в Q_1 раз большее приложенного, где Q_1 — добротность контура возбуждения. Во-вторых, использование C_1 приводит к усложнению конструкции и уменьшению надежности в работе. Применение параллельного контура также не свободно от недостатков: сложность конструкции, большие контурные токи и т.д. Поэтому обычно используются индуктивные системы возбуждения резонаторов без конденсатора.

Рассмотрим этот случай. Полагая в (2) $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ и $X_1 = j\omega L_1$, выражение для тока в резонаторе будет определяться выражением

$$I_2 = \frac{j\omega Me(t)}{\left[\left(R_2 + \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} R_1 \right) + j \left(X_2 - \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} \omega L_1 \right) \right] (R_1 + j\omega L_1)}. \quad (10)$$

Максимальное значение тока будет при

$$X_2 = \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} \omega L_1.$$

Вносимое реактивное сопротивление в резонатор будет емкостным, которое может быть компенсировано расстройкой резонатора в сторону увеличения частоты относительно частоты возбуждения. Величина оптимальной связи петли возбуждения с резонатором будет

$$M_{opt} = \frac{Z_1}{\omega} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = \frac{(R_1 + j\omega L_1)}{\omega} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}. \quad (11)$$

При оптимальной связи вносимое в резонатор сопротивление равно сопротивлению потерь, а ток достигает максимального значения, равного току при полном резонансе.

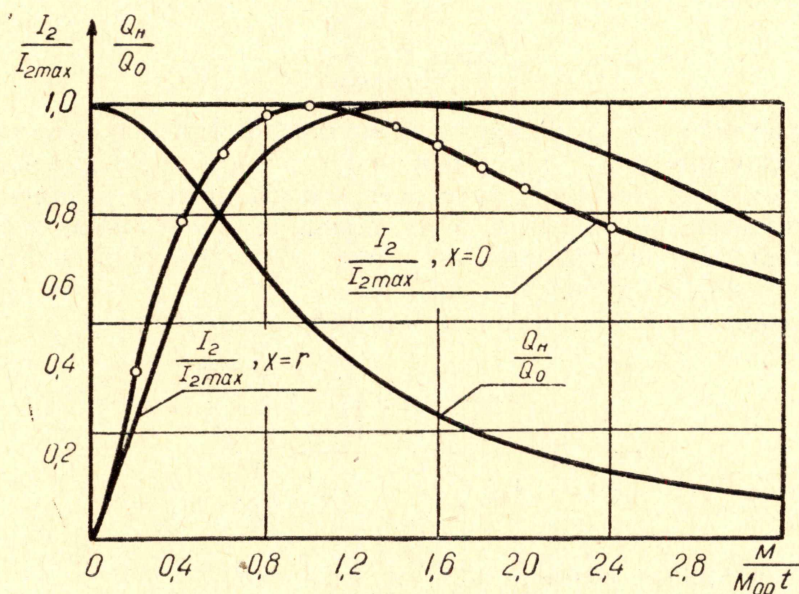


Рис. 2. Относительные зависимости тока и добротности резонатора от величины связи резонатора с источником.

Таким образом, при оптимальной связи и произвольном реактивном сопротивлении цепи возбуждения нагруженная добротность резонатора в два раза меньше собственной. С изменением связи относительно оптимальной изменяется вносимое сопротивление, а следовательно, и нагруженная добротность. Относительное изменение добротности определяется выражением

$$\frac{Q_n}{Q_0} = \frac{1}{1 + \frac{R_{вн}}{R_2}} = \frac{1}{1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_1^2} X_1}, \quad (12)$$

зависимость которой приведена на рис. 2.

При очень малой связи, когда $\frac{R_{вн}}{R_2} \ll 1$, нагруженная добротность почти равна собственной, и это условие необходимо выполнять при из-

мерении добротности резонаторов. Практически достаточно, чтобы $M \leq 0,2 M_{\text{opt}}$.

При расчете высокочастотных ускоряющих систем необходимо учитывать уменьшение добротности резонаторов не только за счет связи с фидером возбуждения, но и за счет нагрузки пучком. Нагрузка приводит к уменьшению шунтового сопротивления и смещению частоты резонатора в зависимости от величины ускоренного тока, напряжения на зазоре резонатора и фазового сдвига между этими величинами. Это потребует дополнительного увеличения связи между генератором и резонатором и соответствующего увеличения подводимой в. ч. мощности.

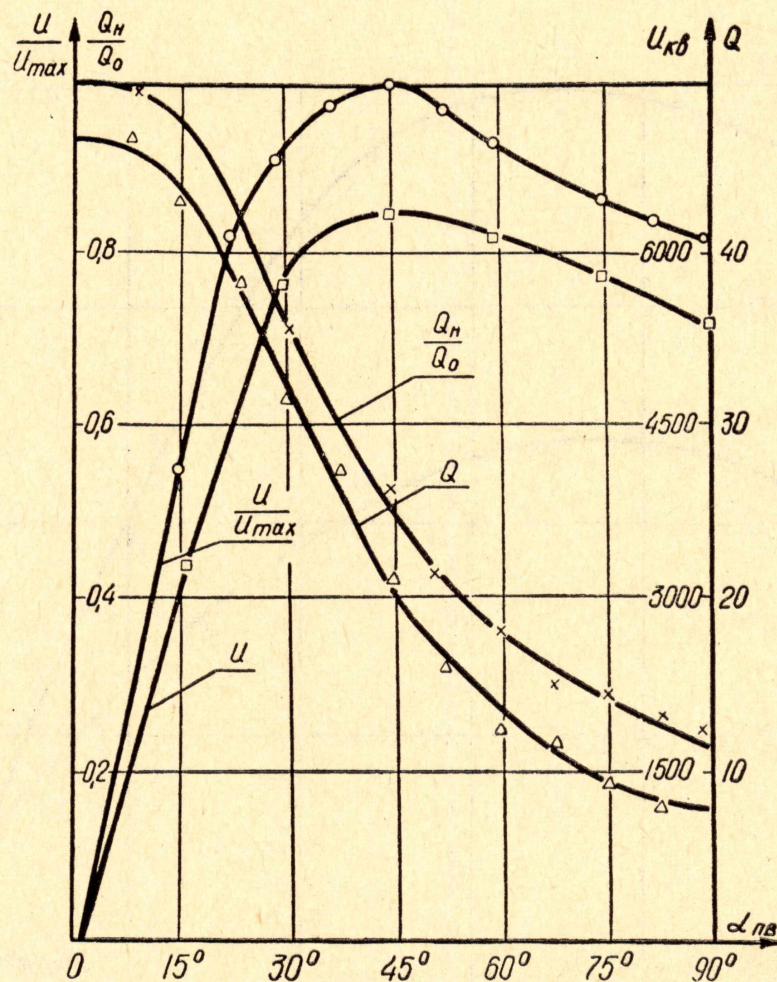


Рис. 3. Экспериментальные кривые напряжения и добротности резонатора от угла поворота петли возбуждения.

Требуемой связи соответствует определенная площадь петли, зависящая от типа резонатора и его параметров. Для тороидального или цилиндрического резонаторов, сильно нагруженных емкостью, эта связь определяется выражением

$$S_{\text{п}} = \frac{\pi(\Phi_1 + \Phi_2)}{\mu_0 \omega_0 Q_0} \sqrt{W_{\Phi} R_{\text{ш}} \left(1 + \frac{\omega^2 L_1^2}{W_{\Phi}^2} \right)} \frac{1}{\sin \alpha}, \quad (13)$$

где $S_{\text{п}}$ — площадь петли в см^2 ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ гн/м}$ — относительная магнитная проницаемость;

ω_0 , Q_0 и $R_{ш}$ — частота, собственная добротность и шунтовое сопротивление резонатора;

Φ_1 и Φ_2 — размеры резонатора;

α — угол между направлением магнитного поля и плоскостью петли.

Величина связи и площадь петли между собой связаны соотношением

$$M = \frac{\mu_0 S_{\pi} \sin \alpha}{\pi(\Phi_1 + \Phi_2)}. \quad (14)$$

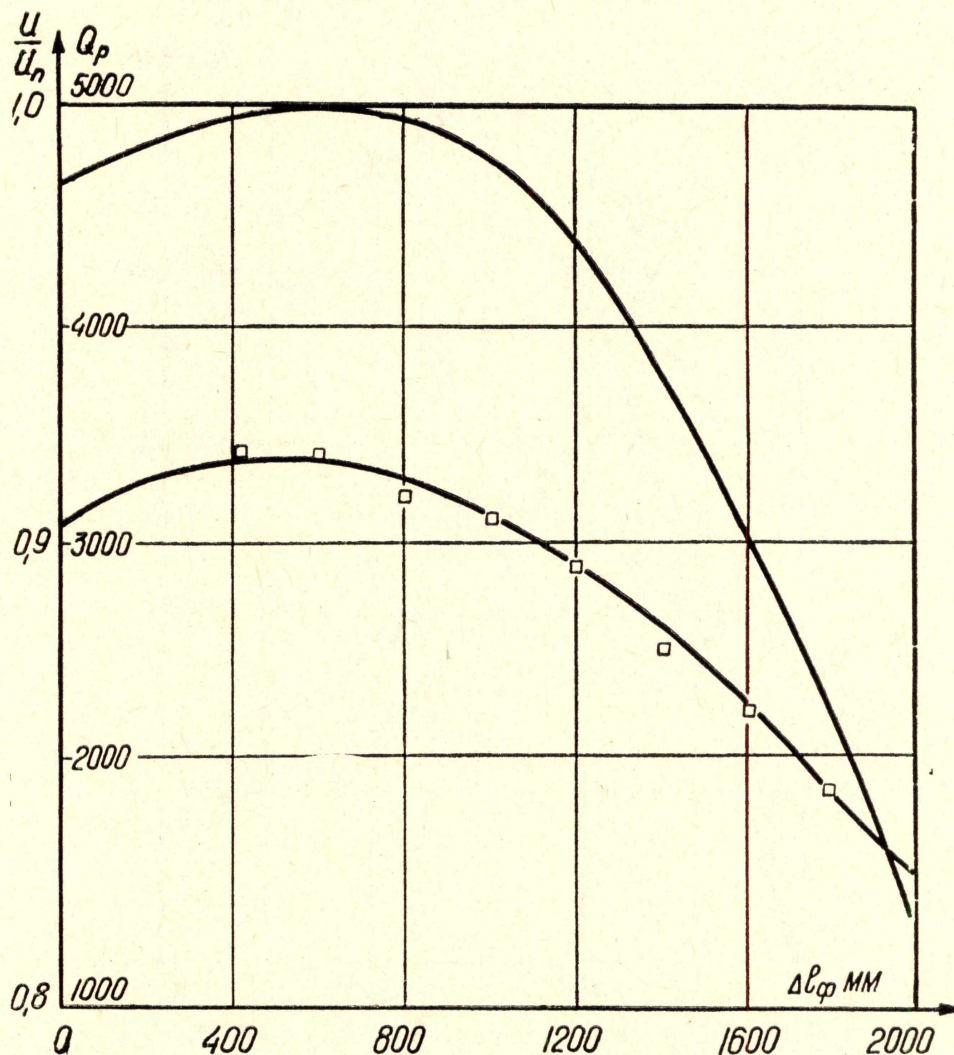


Рис. 4. Экспериментальные зависимости напряжения и добротности резонатора от длины фидера возбуждения.

С целью проверки полученных теоретических результатов и получения наивыгоднейшей связи с резонатором проводилось экспериментальное исследование индуктивного возбуждения резонатора без настройки петли. Параметры цепи: $L_1=260$ см, $C_1=74$ нф, $L_2=106$ см, $C_2=180$ нф, $\rho=24,4$ ом, $\omega_0=230$ 1/сек; $W_{\phi}=60$ ом, $S_{\pi}=170$ см², $\Phi_1=130$ см, $\Phi_2=34,5$ см.

При проведении эксперимента мощность и частота генератора поддерживались постоянными, а настройка системы в резонанс осуществлялась изменением частоты резонатора. Плавный поворот петли произ-

водился в пределах от 0 до 90°. Напряжение на зазоре резонатора измерялось с помощью прокалиброванного индуктивного датчика, а добротность — по времени установления колебаний. На рис. 3 приведены экспериментальные характеристики $\frac{U}{U_{\max}}$, $\frac{Q_n}{Q_0}$, U и Q в функции от угла поворота петли возбуждения. Из графиков следует, что в данном конкретном случае оптимальная связь имеет место при повороте петли на угол 45°, при которой нагруженная добротность равна 3500 и в два раза меньше собственной. Эффективная площадь петли равна $160 \text{ см}^2 \cdot \sin 45^\circ = 120 \text{ см}^2$, а расчетная величина при $Q_0 = 7000$ составляет 112 см^2 . В случае компенсации индуктивности петли емкостью ее площадь уменьшается до 80 см^2 . Из выражений (13) и (14) следует, что величина связи зависит лишь от параметров резонатора и площади петли, но не зависит от ее индуктивности. Следовательно, проектирование петли необходимо производить с условием получения ее минимальной индуктивности. При $\frac{\omega^2 L_1^2}{W_\Phi} \ll 1$ входное сопротивление петли практически активно, а ее площадь минимальна. Из этих соображений желательно выбирать линию передачи с малым волновым сопротивлением, а резонатор с большой добротностью.

Важную роль при выборе связи играет длина фидера возбуждения, т. е. его входное сопротивление, с изменением которого для получения максимального напряжения на резонаторе должна изменяться и оптимальная связь. Это можно показать, анализируя выражение (2), где Z_1 принимается с учетом длины фидера. Это положение подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. 4, где приведены зависимости напряжения на резонаторе и его добротности в функции от длины фидера при определенной связи.

Максимум напряжения и добротности при $W_\Phi = \omega L_1$ имеет место при длине фидера, равной $(2n + 1)\frac{\lambda}{4}$. При компенсации индуктивности петли емкостью величина связи и добротность резонатора не зависят от длины фидера возбуждения.

Таким образом, при расчете радиочастотных ускоряющих систем необходимо принимать нагруженную добротность резонатора в 2 раза меньше собственной, полученной расчетным путем или измеренной при очень слабой связи с источником. При нагрузке пучком шунтовое сопротивление нагруженного резонатора уменьшается и, следовательно, связь необходимо увеличивать относительно оптимальной. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при исследовании резонаторов метрового диапазона синхротрона «Сириус».

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Крылов. Теоретические основы радиотехники. Изд-во «Морской транспорт», Л., 1961.
2. В. А. Визирь, Н. А. Лашук, Б. А. Солнцев. Известия вузов, «Физика», № 6, 1971.